

内陆河流域的 水安全

主编 刘发民 李元红

NEILUHELIUYUDESHUIANQUAN



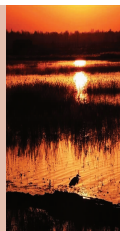
认识地球水循环
规律，权衡内陆河流
域人类和自然用水的
利弊，探索流域人水
和谐之路。



甘肃科学技术出版社

内陆河流域的水安全

主编 刘发民 李元红



认识地球水循环规律，
权衡内陆河流域
人类和自然用水的利
弊，探索流域人水和
谐之路。



甘肃科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

内陆河流域的水安全 / 刘发民, 李元红主编. -- 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2010. 8
ISBN 978-7-5424-1415-1

I. ①内… II. ①刘…②李… III. ①内陆河 - 流域 - 水资源管理: 安全管理 - 研究 - 中国 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 161905 号

责任编辑 毕 伟 (0931-8773274)

封面设计 毕 伟

出版发行 甘肃科学技术出版社(兰州市南滨河东路 520 号 0931-8773237)

印 刷 甘肃天河印刷有限责任公司

开 本 710mm × 1020mm 1/16

印 张 22

字 数 350 千

插 页 2

版 次 2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月第 1 次印刷

印 数 1~1000

书 号 ISBN 978-7-5424-1415-1

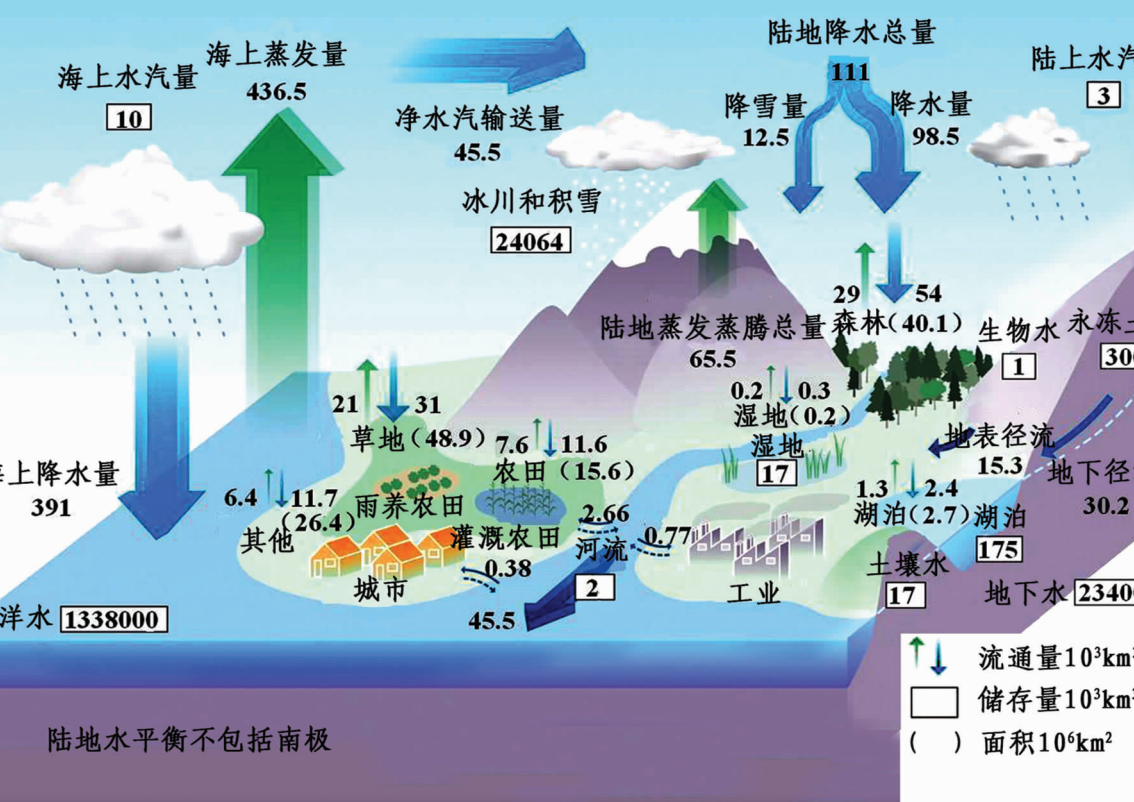
定 价 58.00 元



刘发民主编(email:liufamin@lzb.ac.cn)在石羊河流域蔡旗断面考察

李元红主编(email:gssk@163.com)在黄羊河水库考察





地球表面的水循环



决不能让民勤成为“第二个罗布泊”

前 言

水是维持人类和其他生命系统存在和发展的重要因素，对人的生命健康和生态系统的稳定尤为重要，是保障国家或区域经济发展的基本条件。随着人口增加和社会的快速发展，水资源短缺和水环境恶化问题越来越突出，水安全问题已经是国内外专家学者、各国政府和国际组织关注的大问题。1972年，联合国就发出警告，“水，将导致严重的社会危机”，水的问题是21世纪危及全球的重大国际问题。河西走廊内陆干旱区位于甘肃省西北部，历史上是古丝绸之路要道，现今已成为连接新疆和中亚的通道，具有重要的战略地位，经过半个世纪的建设，已是西北地区重要的工农业生产基地。建国以来，河西内陆区在水资源的利用方面取得了很大的成绩，由于其地域辽阔，土地资源丰富，走廊绿洲地区的人类活动使土地生产潜力得到了发挥，环境容量进一步提高，为人类的生存拓展了空间。但是，干旱区水资源数量有限，其质量和时空分布对人类活动极为敏感，随着人口数量增加，人类开发利用水资源强度加大，农业超量用水，导致水资源短缺、生态植被衰退和土地沙化，流域内部的水循环改变，水资源问题和生态环境问题日益突出。水成为保障流域安全、政治稳定和可持续发展的首要因素，引起了社会公众、科研工作者和政府部门的高度重视。

内陆河流域要实现生态和环境安全，就要全面重视和解决水资源的问题。内陆河流域有其自身的特点，必须服从这里的环境和生态系统条件，努力保护资源、环境和生物多样性。要重视改善当代人的生活，充分认识当代人对水资源的需要以及随时间和空间的变化规律，努力提高当地人民的生活水平，缩小贫富差距；同时，要重视留给后代的资源环境，对水资源的开发和管理不能剥夺后代人实现目标和满足需要的权利，也就是说至少要能够留给后代人相同的经济、环境和生活水平，通过水资源的管理实现水资源利用的平等和公正。基于这些目标，我们编写了《内陆河流域的水安全》，以内陆河流域水资源为主线，系统论述了人类水资源利用与自然用水的平衡关系及其影响要素，探讨内陆河地区水资源利用与人

水和谐之路。

本书共十二章。第一章（刘发民、李元红、王利荣）生命之水与生物圈水流；第二章（刘发民、李元红、王利荣）可利用水及水资源开发；第三章（刘发民、李元红）人类对水资源的需求与适应；第四章（刘发民、李元红）自然界用水与养活人类的水观点；第五章（刘发民、李元红、赵亮）内陆河流域水资源生态景观功能与价值；第六章（刘发民、李元红）内陆河流域水安全问题与管理理念；第七章（高前兆、刘发民、温小虎）河西内陆区水资源系统与特性；第八章（刘发民、李元红、马燕玲、张正卓、周荣）内陆河流域的农业多功能性；第九章（马燕玲、刘发民、张正卓、刘晓荣）内陆河流域的生态补偿；第十章（刘发民、李耀辉、马燕玲、赵亮）气候变暖与流域安全；第十一章（刘发民、高前兆、张正卓、李元红、周荣）内陆河流域生态安全建设与水资源；第十二章（高前兆、刘发民、张新民、张正卓、李元红、肖生春）内陆河流域的水安全对策。

本书内容的研究和撰写，得到“甘肃干旱内陆区特色经济作物节水综合技术研究示范（2007BAD88B07）”、“石羊河灌溉水循环转化规律及节水技术研究（200801009）”、“半干旱地区主要作物对气候变化响应机理研究（IAM200808）”、“民勤—雅布赖风沙口综合治沙技术集成试验示范（2007BAD46B01）”、“红砂叶片水分吸收利用及生态水文意义研究（40901019）”、“河西内陆区水资源战略安全与保障措施研究”、“西北干旱区地表地下水系统变化及其植被生态效应”等科研项目的资助。高前兆研究员对全书的章节和结构安排提出了意见并审阅修改初稿，在此表示感谢。

本书是作者依据在甘肃河西内陆河流域长期从事科研工作积累的成果，并引用大量国内外相关资料完成的，书中也提出了一些不完全成熟的观点，希望能够起到抛砖引玉的作用。例如，通过农业多功能性的分析，认为从农业多功能性的正外部性看，内陆河流域绿洲农业是当地人口生存的重要基础产业，必须给予充分重视，而不宜实施“虚拟水”贸易解决流域的水资源短缺和生态退化问题。另外书中引入并论述了绿水和蓝水等概念，综述了植物水分关系研究的新进展，讨论了气候变暖对流域安全的影响等热点问题。由于受作者水平所限，书中错误和疏漏之处在所难免，敬请读者指正和批评。

刘发民 李元红

2010年7月1日

目 录

第一章 生命之水与生物圈水流 / 001

第一节 生命之水 / 001

第二节 重视不可见的水 / 006

第三节 植物水分利用 / 007

第四节 人类对景观的干预 / 009

第五节 短缺的淡水资源越来越昂贵 / 011

第二章 可利用水与水资源开发 / 015

第一节 可利用水 / 015

第二节 水资源评估 / 019

第三节 水资源的开发利用 / 023

第三章 人类对水资源的需求与适应 / 031

第一节 人类对水资源的需求 / 031

第二节 社会对水短缺的适应 / 042

第四章 自然界用水与养活人类的水观点 / 048

第一节 水与生态系统 / 048

第二节 养活人类的挑战 / 054

第五章 内陆河流域水资源的景观功能与价值 / 062

第一节 水资源的景观功能 / 062

第二节 水资源的生态价值 / 068

第六章 内陆河流域水安全问题与管理理念 / 072

第一节 内陆河流域的水安全问题 / 072

第二节 水资源的管理理念 / 079

第七章 河西内陆区水资源系统与特性 / 091

第一节 内陆河流域水资源特点 / 092

第二节 流域水循环的水资源评价 / 094

第三节 河西内陆河流域水循环特点 / 098

第四节 流域水资源的数量评价 / 101

第五节 内陆水循环问题讨论 / 110

第六节 黑河流域的水化学特征分析 / 111

第八章 内陆河流域的农业多功能性 / 118

第一节 农业多功能性的概念和特点 / 118

第二节 多功能性农业和农村政策 / 120

第三节 内陆河流域农业的多功能性 / 127

第九章 内陆河流域的生态补偿 / 131

第一节 建立生态补偿机制的意义 / 131

第二节 国内外生态补偿研究进展 / 133

第三节 民勤县主要生态建设工程及政策措施 / 143

第四节 民勤生态补偿机制 / 165

第五节 加快民勤生态治理的对策建议 / 172

第十章 气候变暖与流域安全 / 186

第一节 植物水分关系 / 186

第二节 气候变暖对植物的影响 / 211

第三节 气候变暖影响水循环与粮食安全 / 224

第十一章 内陆河流域生态安全建设与水资源 / 231

第一节 生态系统需水量和水资源承载力 / 231

第二节 流域生态建设与水资源 / 236

第三节 内陆河流域水资源承载力 / 261

第十二章 内陆河流域的水安全对策 / 264

第一节 保障水安全的水资源分析 / 264

第二节 河西走廊内陆河流域水安全综合评价 / 281

第三节 内陆区水资源战略安全构想 / 287

第四节 流域水安全保障体系建设 / 309

第五节 水资源安全保障体系的实施 / 316

参考文献 / 318

第一章 生命之水与生物圈水流

水是地球上所有生命最重要的组成部分，参与水文循环的水总是处于运动状态，对生物的生存有重要的作用，几乎所有的生物都含有大量水分。没有水，也就没有了生命。水也是人类所有经济活动持续发展的基本条件。在现有技术条件下，人类还没有找到能替代水的物质，还无法模拟出一个类似地球一样的、可供人类生存的生态环境。地球是人类唯一的家园，人类应当努力保护它，而不是破坏它。

第一节 生命之水

如果地球外有人调查我们居住的这个星球，那么一定会疑惑为什么称为地球，而不叫做水球。水大约覆盖了地球表面的75%，有 $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$ 的水量。然而，这些水中只有很少的一部分是可以利用的淡水。地球的第二个特征是生命形式的数量繁多和种类丰富，这是一个真正的“生命星球”（Attenborough, 1984）。水和生命有错综复杂的联系。水在我们身体里大约占70%。世界上一半以上的植物和动物生活在水里，甚至连来自陆地的食物也是全部依赖于水并且大部分是由水组成的。

1.1 水循环是联系人类社会和经济系统的纽带

水（ H_2O ）是一种特殊的混合物，与其它大多数物质有显著差异，水在固态（冰）时的密度比液态时的小，因此冰可以浮在液体水面。水的热性质与密度性质也很有趣，在 4°C 时密度最大并且随着水的温度升高或降低密度都将变小，温度降低到 0°C 时水就结为冰（这些温度指的是纯水的温度，含有可

溶物质的水如海水，有较低的结冰温度)。

世界上水的总量大约为 $1.386\times10^9\text{km}^3$ ，其中超过96%的都是咸水。在全部淡水中，68%以上的锁定在冰山和冰川中，剩下的30%淡水是地下水。地表的淡水资源，如江河和湖泊，只占有 $9.31\times10^4\text{km}^3$ ，占全部水量的1/15000。然而，江河湖泊仍然是人们每天用水的最主要来源，表1-1是全球水分布的估算 (Gleick, 2009)。

表1-1 全球水分布的估算

水源	水量 (10^3km^3)	分布面积 (10^3km^2)	淡水的百分比 (%)	总水量的百分比 (%)
总水量	1386000	510000100		100
淡水总量	35000	149000	100	2.53
大洋、大海和海湾	1340000	361300	—	96.5
冰帽、冰川和永久积雪	24064	16230	68.76	1.74
地下水	23500		—	1.76
淡水	1050030		—	0.76
咸水	13000		—	1
地下冰和永久冻结带	300	21000	0.86	0.022
湖泊	176.4	2062	—	0.013
淡水湖	91	1240	0.26	0.007
咸水湖	85.4	822	—	0.006
大气	12.9		0.04	0.001
湿地	11.5	2680	0.03	0.0008
河流	2.12		0.006	0.0002
生物水	1.12		0.003	0.0001

来自太阳的能量，每天从地球蒸发超过 1000km^3 的水。然后这些水凝结并以降水的形式返回地球表面，也许是液态（雨）、固态（雪）或者气态（水蒸气、雾）等形式。气候系统决定着可更新水资源循环量的上限，所有这些循

环水的相态都可能受人类的影响。降水一旦到达地球表面，可能被截留，或者成为地表水径流的一部分，流到河流和湖泊并且最后汇入海洋。降落到极地或高海拔地区的一些降水，形成冰盖或冰川储存上千年。另一些降水可能渗入土壤，成为地下水系统的一部分，在地下水盆地和岩层中也可以驻留很长一段时期才能重新回到地表（图1-1）（Oki and Kanae, 2006）。

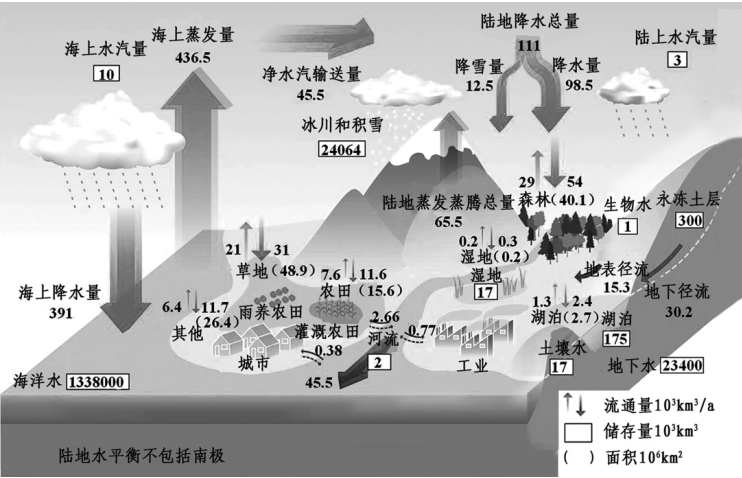


图1-1 地球表面的水循环图

表1-2是水循环中各种水源的平均驻留时间（Physical Geography, 2006）。大约每3000年，水从地球到达天空再返回来的这种运动所循环的水量与世界上海洋的水量相同。人类活动可以改变水循环系统中各部分水源的数量和质量，往往伴随着消极的响应。例如，对于驻留时间超过千年的深层地下水的开发利用，需要很长的时间才能回补，这种地下水也称为化石水。

表1-2 水的平均驻留时间

贮水处	海洋	冰河	季节性 积雪	土壤	浅层地 下水	深层地 下水	湖泊	河流	大气层
平均停留时间	3,200 年	20~100 年	2~6月	1~2月	100~ 200年	10,000 年	50~100 年	2~6月	9日

总结人类过去在管理自然或与自然协调相处的成功和失败的案例，需要更好地理解水在全球生命支持系统中的作用和功能。水通过它的物理、化学

和生物作用，在水循环中起着基础的平衡功能（Ripl, 1995）。这种功能是通过三个重要的交互作用的平衡过程实现的：

（1）物理过程：蒸发（包括升华）和凝结的交互作用是地球能量分布的重要过程；

（2）化学过程：结晶和分解的交互作用是地球可溶性物质分布的基础过程；

（3）生物学过程：光合作用过程中水分子的裂解和以后通过呼吸作用的再合成之间的交互作用来制造糖和氧的过程。

淡水循环、人类生活和生态系统之间存在密切联系。植物的蒸腾为生物量生产做出了直接的贡献，这部分水被称为绿水，由于在实际中很难将植物蒸腾和地面蒸发分开，因此虽然有人认为蒸发应该称为白水，但是目前多数学者还是将蒸发和蒸腾的水统称为绿水。降雨形成的地表径流、河流水、地下水称为蓝水。降水滋润的陆地系统通过生物量的生产过程使绿水返回到大气中，而蓝水构成的栖息地喂养了水生生物。人类社会从水循环的淡水服务中获得了利益，建立定居地、建立工厂、灌溉农作物。水循环的不同分支主导着不同的关键功能，陆地生态系统的生物学功能与绿水流密切相关，蓝水流是陆地生态系统质量的驱动力，起重要的化学功能。重要的是要认识到，地球生命支持系统是由自然系统包括水圈和生物圈以及包括人类活动的社会经济圈构成的（FAO, 2000）。

1.2 绿水流和蓝水流

社会的发展依赖着水文循环中水流在复杂的生态系统中的分配，这就需要应用多学科知识，对水资源的服务功能进行评估。由Falkenmark（1997）提出的绿水和蓝水概念，已经引起了许多学者的关注。她定义的蓝水就是通常认为的水资源，也就是河流、湖泊和地下水，这些水可以为人类直接取用；绿水包括植物蒸腾消耗的水量和地表、水体的蒸发量（有人把陆地地表及水体蒸发的水量称为“白水”）。这些提法只是对原有水循环中水流动过程名称的提法改变，由于绿水和蓝水在叙述方面比较简洁，所以本书也采用这两个术语，绿水指的是蒸腾和蒸发的水量。生产性的绿水流是植物或树木的蒸腾用水，对植物的生物量积累有直接贡献作用。非生产性的绿水流是水体和地

表的蒸发水，以及植物或树木冠层截留的雨水蒸发。因此绿水流是通常所说的蒸散发，包括生产性和非生产性水汽流。绿水和蓝水是水文循环中水的不同形态、并且能够通过降水纽带相互转化。从维持生态系统的观点看，植物蒸腾利用的水通过对陆地生态系统服务的贡献，直接支持了人类的生活，这些水流支持着草地、森林、湿地以及作物的生存和生长。绿水不仅为所有陆地植物提供生长的必备条件，调节着全球的气温，并对陆地的降水模式起着重要的调节作用。植物的生物生产量、绿水量、降水量三者成正比例线性关系，并构成一个循环模式。生物生产量越大，蒸腾量即生产性绿水量也越大，降水也越多。反之，森林植被覆盖和植物生产量不断减少，降水会越来越多地成为地表径流流走，植物蒸腾也就越来越小，降水模式随之改变，气候也就变得日益干燥。蓝水流是在地表或地下流动的液体水流，蓝水能够以地表径流或地下水流回补地下水位。

蓝水和绿水支持了生态系统的功能，传递了生态系统的物质和服务，是人类生存和社会发展的先决条件。蓝水和绿水之间的一个重要差异是，绿水是消耗性利用水，上游利用的绿水下游就不能直接再利用，而蓝水可以被下游直接再利用，例如，上游农田灌溉水部分通过渗漏补充地下水就可供下游再利用。随着人口增加，上下游人类活动和粮食生产的矛盾将更加尖锐，因此蓝水和绿水概念的提出将有益于认识水资源利用矛盾的根源和制定解决问题的对策。

1.3 社会和生态系统共享相同的水资源

如果从景观尺度上看水循环，生命支持系统依靠的水源是降雨或降雪，生命支持系统对水资源的利用从降水到达地面就开始利用，降落到地面的水分成了绿水和蓝水，前者是蒸散发，后者构成了陆地的水资源系统。森林、草地和雨养作物的生存主要依靠的是雨水资源，利用的形式是绿水，而蓝水是进入河流和地下水流系统的水资源，能够被人类“收获”利用，人类利用的结果是部分形成了绿水，部分再次进入了蓝水流系统。这些水流随着人类活动的增强，污染物质含量通常增加，例如农田灌溉造成的面源污染和工业废水造成的点源污染。水资源滋养了陆地生态系统和水生生态系统，但是这

种滋养能力的有限性，使得人类利用的水资源量也是有限的，水危机问题的核心和环境灾难后果是人类没有处理好利用水资源与自然界的平衡关系。

第二节 重视不可见的水

2.1 曾经关注的是可见的水

人类的历史也是控制水资源的历史。社会的进步、人口的增加和粮食产量不断提高，都包含有人类增强控制水资源能力的贡献。例如水坝的建设和高扬程提水工程都是人类社会利用水资源的标志。但是在对水资源利用的同时，人类也在污染水资源，工业废水的排放、化学肥料和农药的使用已经造成许多河流和地下水资源的质量退化。

长期以来，人类关注的是可见的蓝水资源，重视实施工程措施控制流域水资源，提高粮食产量的对策是增加灌溉面积。实际上，世界上有60%~70%的粮食来自于雨养农业（Wood，2000）。森林和草地同样消耗了大量的水资源。即使灌溉水资源，真正能够被植物利用的水都要通过土壤水分的转换，直接对植物有贡献的水是蒸腾水，其余灌溉水多数作为对作物无效水而浪费消耗了。因此，应该关注植物蒸腾水的功能和数量，这些水对植物生产有直接贡献作用。

土壤水分在水文过程和生物地球化学过程之间起着关键的联系作用，影响着植物的蒸腾、地表径流、植物对碳和其他营养物质的吸收，是气候、土壤和植被相互作用的重要节点，它的时空动态是生态水文学的核心。

2.2 植物生产消耗水资源的尺度

植物生产主要利用的是土壤水分，水是土壤中的非生物因子。人们通常关注的是生态系统可以看见的物品服务，例如粮食、鱼类、生物量，而没有关注生产这些物品的生态系统的功能。植物生产与水的内在联系应该给予充分重视。绿水是由生产性的蒸腾水流和蒸发水流组成，在干旱和半干旱地区，由于自然生态系统和农业生态系统中植被的稀疏性，造成大部分的绿水流是

非生产性的，也就是大多数水被蒸发浪费了。通常灌溉水大约有2/3成为无效水浪费了。

2.3 绿水流支持降雨的作用

在水循环中绿水流支持了景观上部的降水形成，构成了重要的水分循环反馈环。在全球尺度上，我们知道大约40%的陆地降水来自海洋水汽，是通过风运输的，而60%的降水是陆地地表产生的内部水循环。因此，支持生物圈的大部分水资源是生物圈本身产生的，景观的结构变化对区域降雨格局有重要的影响作用。依据经验，水汽运输的陆地距离超过500~1000km时，本地的蒸发效应对降水的贡献比海洋水汽的大。例如在萨赫勒地区，90%的降水来自于陆地蒸散发；在美国的中部，内部水分循环占总降水量的60% (Bosilovich, 2001)。

因此，陆地表面的蒸散发使水汽循环并形成了本区域的降水，降水量与大气水汽含量有线性相关关系 (De Groen, 1996)。如果在陆地完全没有植物和水体的蒸散发，降水全部从河流流入海洋，则降水只能限制在大约距海岸500km的陆地范围内，但是事实是降水能够到达距海岸2000km的范围。随着人类活动的加剧造成土地利用的变化，增加了降水转化为径流的百分比，减少了反馈给大气的水汽量，使得区域降水量成减少趋势。人类活动对区域干旱有贡献作用，造成了土地的进一步退化。

第三节 植物水分利用

3.1 植物对水分的吸收利用

植物在进行光合作用的时候要打开气孔吸收大气中的 CO_2 ，同时植物中的水汽就通过气孔扩散到空气中，植物通过根系吸收土壤水分运输到叶面补充损失的水分。植物水分运动的动力是叶子的表面张力，在叶子表面和土壤之间形成的水势差驱动着植物体中水分的运动。因此，植物可被看作是构造复杂的有很强吸水能力的“水泵”，依据能量守恒法则，植物根系通过吸收土

壤水分来平衡在根系和叶面之间形成的压力差，从而使土壤水分流向叶面蒸发。植物的“水泵”功能通常是在有阳光照射、植物进行光合作用时才起作用，而在晚上气孔关闭的时候多数植物向大气蒸腾损失的水分就大大减少。植物受到水分胁迫的时候，根系区域的土壤含水量减低，植物吸收运输的水量就要减少，直至植物凋萎死亡。

植物吸收的水分大多数都逸失到大气中了，生产1t的生物量需要消耗的水量大约为200~1000m³。植物散失水分的同时，吸收利用了大气中的CO₂、从土壤中运输了植物所需的营养物质、冷却了植物、维持了细胞（组织）的膨胀。而且，植物通过水力信号和根系化学信号向叶面的传导，控制叶子气孔的关闭，调节植物的水分损失量。

植物种的进化使得植物能够适应它们生存的环境。在干旱地区，植物的叶片变态成为鳞片状（桉柳）或同化小枝（梭梭）以减少水分的损失。C₄植物有贮存CO₂的能力，减少了气孔散失水分的数量，提高了水分利用效率，例如玉米和高粱，而C₃植物如小麦就没有这种功能。

3.2 陆地植物群落的水分利用

陆地生态系统可以用水文气候要素划分，一般是在降水和潜在蒸发之间有关关系。干旱地区的生物生产力通常较低，年生物量生长约为300~700g/m²（Wainwright, 1999）。降水通常受季节、年份的影响，蒸发潜力大而降水少的地区一般植被比较稀疏，水分是植物生长和维持的主要控制因子。通常森林生态系统区域的降水较多，树木也有较强大的根系系统，能够利用较深层的土壤水分。森林通常是陆地的主要绿水贡献者，总的贡献量为20000km³/a（Rockstrom, 1999）。森林的蒸腾大约3~4mm/d，通常是潜在蒸发量的0.3~0.5倍，植物的根系分布差异很大，有些植物的根系能够到达100m以上的深度。

森林或树木对降水的再分配作用是很显著的，决定了降水的入渗和径流的形成，保护流域上游的森林对河川径流量的稳定有重要意义。森林能够影响局部的水汽形成和凝结，影响周围区域的降水格局。对森林的破坏能够增加河川径流量，但是减少了干旱时期的流量，关键是降水到达土壤表面后是形成了地表径流或蒸发了或形成了土壤水分，森林或树木对降水的这些不同